



Salto del Tequendama, Bogotá, Colombia. B.D. Uniandes Planetaria

MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS

Cap 17

AGUAS SUPERFICIALES

GONZALO DUQUE ESCOBAR

La hidrosfera alude a toda el agua en, sobre o por encima de la superficie de la Tierra; en los océanos, ríos o lagos, bajo la Tierra o en el aire.

17.1 EL MAR

Geológicamente, el mar es importante como espacio de sedimentación, así como por las fluctuaciones que en él tienen lugar, motivadas por procesos epirogenéticos, por la eustasia y la isostasia (trasgresión y regresión).

Tabla 20. Componentes disueltos en el agua de mar.

Elemento o compuesto	Concentración Partes/millón
Cloruro, Cl^{-1}	19000
Sodio, Na^{+1}	10550
Sulfato, SO_4^{-2}	2460
Magnesio, Mg^{+2}	1290
Calcio, Ca^{+2}	400
Potasio, K^{+1}	380
Bicarbonato, HCO_3^{+1}	140
Bromuro, Br^{-1}	65
Ácido bórico, H_3BO_3	25

La Tierra. Círculo de lectores, 1985.

17.1.1. Cambios de nivel. Los cambios de nivel del mar, se miden en relación con la tierra emergida, los cambios diarios causados por las mareas son bastante conocidos. Pero hay otros cambios como los eustáticos y tectónicos, que son movimientos lentos y extendidos continentalmente, o tan locales y raros como inadvertidos. Si la variación del nivel del mar se explica por el océano, se denomina cambios eustático. Cuando aquella se explica por movimientos del suelo, se denomina tectónico. Los primeros, por regla general, son movimientos regionales y persistentes en el largo plazo, mientras los segundos tienden a ser locales y espasmódicos

Las variaciones en el nivel del mar se pueden explicar por variaciones del clima que modifiquen la superficie de los glaciares, y también por los cambios radicales e importantes de tamaño y forma de las cuencas oceánicas, a causa de procesos de deposición, erosión, y reconstrucción magmática del fondo oceánico.

17.1.2 Corrientes marinas. Las corrientes del mar, son otra forma de movimientos del agua de los océanos. Hay corrientes horizontales y verticales, cuya velocidad varía de un punto a otro, pero que cada 1800 años mezclan las aguas oceánicas. El origen de tales corrientes es complejo, pues se causan por contrastes de densidad, por la rotación de la Tierra, por el viento y por las mareas. Entre ellas tenemos las corrientes de marea, las corrientes de densidad y las corrientes marinas propiamente dichas.

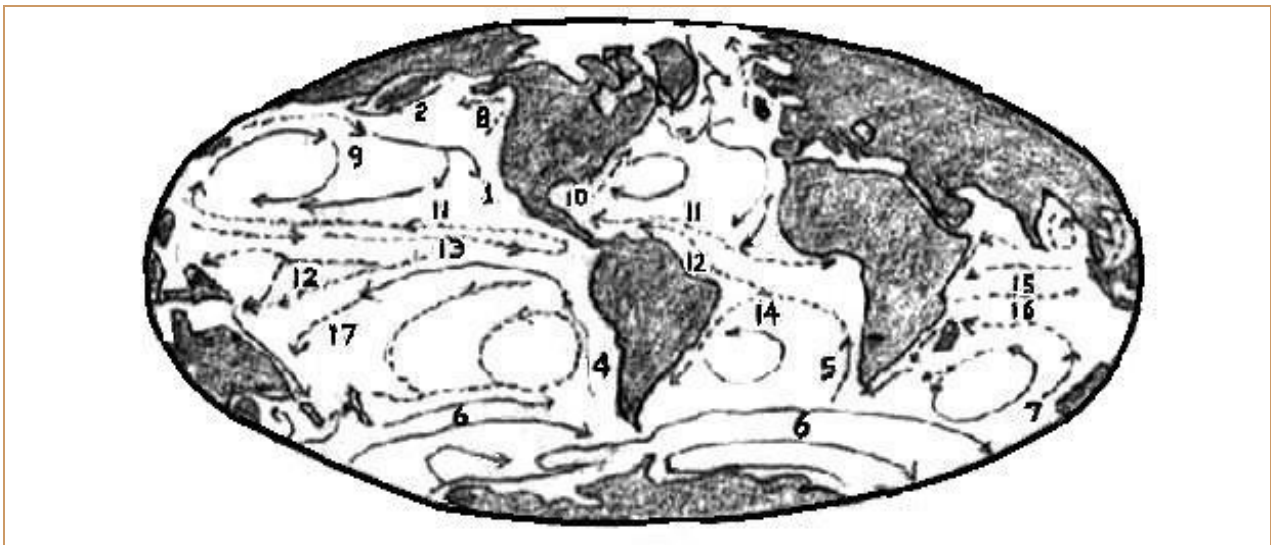


Figura 107. Corrientes oceánicas. Corrientes frías (----): 1. de California, 2 Oya Shivo, 3. de Canarias, 4 de Perú, 5. de Benguela, 6. deriva de los vientos del W, 7. de Australia W. Corrientes cálidas (- -): 8. de Alaska, 9. Kuro Shivo, 10. Del Golfo, 11. Ecuatorial del N, 12. Ecuatorial del S, 13. Contracorriente ecuatorial, 14. De Brasil, 15. Contracorriente ecuatorial Indica, 16. Ecuatorial, 17. De Australia E. Adaptado de La Tierra, Salvat.

- **Corrientes de marea.** Las corrientes de marea, son locales, horizontales pero a menudo rápidas (hasta algunos Km./h). Se deben a la acción del sistema Tierra-Sol-Luna.

- **Corrientes de densidad.** Se explican por cambios de temperatura, salinidad y carga en suspensión. Incluye los movimientos convectivos, entre los fríos polos y el ecuador, que irrigan oxígeno a los fondos oceánicos.

- **Corrientes marinas.** Son las corrientes superficiales que aprovechan los marinos de veleros. Son enormes ríos marinos de varios cientos de km. de ancho, que como grandes flujos se trasladan, verticalmente a causa de contrastes de temperatura y salinidad, y horizontalmente por el impulso transmitido por la rotación terrestre. Aquí el viento ocasiona movimientos horizontales que van sufriendo desviaciones introducidas por la fuerza de Coriolis. El conocimiento de las corrientes fue fundamental para transitar mares y océanos en embarcaciones sin motor.

Las corrientes cálidas proceden del ecuador y los trópicos, y las frías de los polos. Unas y otras se contorsionan dextrógiramente en el hemisferio norte y levógiramente en el hemisferio sur.

17.1.3 Las mareas. Son variaciones regulares y cíclicas del mar producidas por la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol. Entre la subida (flujo y marea alta) y el descenso (reflujo y marea baja) del nivel del mar transcurren 12 horas y 25 minutos.

La marea alta coincide con la culminación superior de la Luna, y la baja con su culminación inferior. La diferencia entre ambas se denomina amplitud de marea. Para explicar la existencia de las mareas son de importancia la fuerza de atracción gravitatoria y la fuerza centrífuga. La Tierra y la Luna se atraen mutuamente para girar alrededor de un centro de gravedad. De esta forma se genera una fuerza centrífuga opuesta a la de atracción. En los lugares de la superficie terrestre, para los que la Luna está en el cenit o en el nadir, se origina una cima de marea.

A consecuencia a rotación de la Tierra las cimas de marea se mueven diariamente alrededor de la Tierra y producen dos mareas, que cada día se suceden 50 minutos más tarde, interviniendo también en ello variaciones locales. La atracción secundaria del Sol -que teniendo más masa ejerce menor influencia por estar demasiado lejos- origina las mareas vivas (en oposición y conjunción o con Luna llena o nueva); las mareas muertas, con un flujo especialmente bajo (cuando estamos en cuadraturas o creciente y menguante).

La actividad de las mareas en su conjunto depende de la geometría de las cuencas oceánicas, y la amplitud, de la forma de la costa. También los continentes responden, plásticamente, a la atracción conjunta del sistema Sol - Tierra - Luna, con mareas continentales.

17.1.4 Perfil hipsográfico. Según la distancia a la que se encuentren de tierra firme y su profundidad, se distinguen en el mar la zona costera o litoral situados en la cercanía inmediata de la costa; la nerítica en la zona

del zócalo hasta los 200 m de profundidad y la batial (200 a 800 m), dentro del sector de profundidad media; y dentro del sector profundo las zonas hemipelágicas (talud continental: 800 a 2400 m) y eupelágica (a partir de los 2400 m), con las plataformas pelágicas (2400 a 5500 m) y las fosas pelágicas o abisales (más de 5500 m).

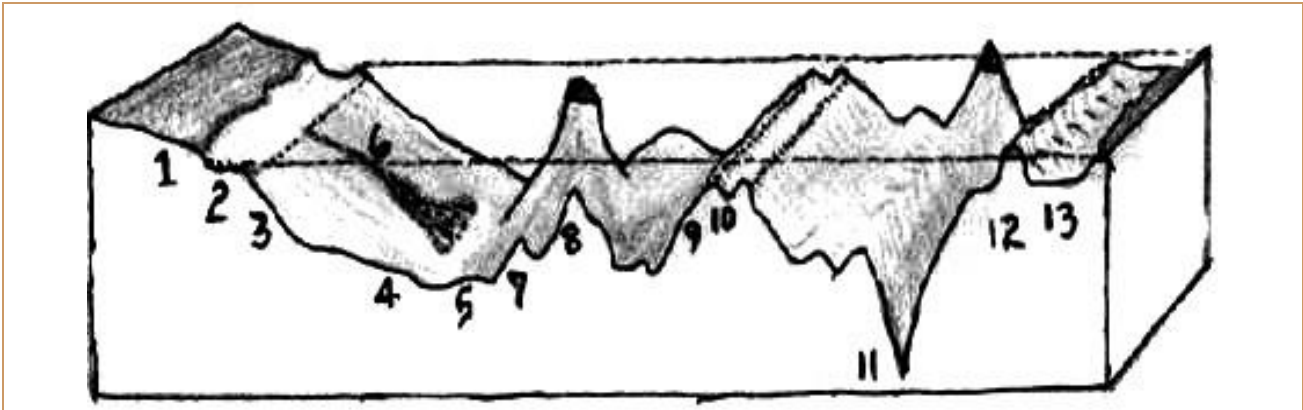


Figura 108. Fondo del mar: 1. continente, 2. plataforma continental, 3. talud continental, 4. umbral continental, 5. cuenca abisal, 6. cañón submarino, 7. colinas abisales, 8. monte submarino, 9. dorsal mesoceánica, 10. Valle central, 11. Fosa oceánica, 12. Arco de islas, 13. Mar continental. Adaptado de La Tierra, Salvat.

Se denominan, isobata a la línea que une puntos del fondo marino con igual profundidad; línea base de las olas, a la profundidad en el mar por debajo de la cual no existe erosión o acarreo de material por acción de las olas; corriente de turbidez a la masa de agua que viajando con movimiento violento, pendiente abajo, transporta sedimentos en el mar; litoral, a la región entre las líneas que marcan la marea alta y la marea baja; monte submarino, a la montaña que se eleva del fondo sin alcanzar la superficie del mar; guyot, al monte marino con la parte superior llana, al parecer por la acción erosiva de las olas; y atolón a la cadena de islas, formadas de arrecifes coralinos, que a la manera de anillo encierran dentro del arco una laguna marina.

17.2 ATMOSFERA E HIDRÓSFERA

La presión del aire sobre la superficie de la Tierra es $p_0 = 1,013 \times 10^5$ Pascales. Esto significa que sobre toda la superficie terrestre, cuya área es $4 \pi R^2$, actúa una fuerza total de $4 \pi R^2 p_0$. El origen de esta fuerza es, naturalmente, la atracción. De acuerdo con la segunda ley de Newton, dicha fuerza es igual a la masa de la atmósfera terrestre multiplicada por la aceleración de la gravedad g . De aquí no es difícil calcular la masa de la atmósfera de la Tierra M_A :

$$m_A = 4\pi R^2 \rho_0/g = 5,3 \times 10^{18} \text{ Kg}$$

Como se ve, la misma constituye casi una millonésima parte de la masa total de la Tierra. Es aún más interesante comparar la masa de la atmósfera con la del agua en nuestro planeta: el 98% del agua se encuentra en los océanos, el 2% corresponde a los glaciares, principalmente de la Antártica y de Groenlandia, mientras que la masa de los depósitos de agua dulce y del vapor de agua es relativamente pequeña. A su vez la cantidad total de agua en la Tierra constituye $1,4 \times 10^{21}$ Kg, es decir, su masa supera 266 veces la de la atmósfera.

17.2.1 Las aguas de precipitación. El origen de las aguas de precipitación debidas al ciclo del agua es principalmente la superficie de los mares. Se evalúa esta superficie en 365 millones de Km.², los que representa el 73% de la superficie total terrestre. Por otra parte, la aportación calorífica de la radiación solar permite convertir en vapor de 2 a 3 litros de agua por m² y por día. Según esto el agua evaporada sobre el globo cada día suma 10¹² metros cúbicos.

Bajo la acción de la radiación solar, el agua de los mares y de los continentes se transforma parcialmente en vapor que se eleva en la atmósfera. Cada metro cúbico de aire podría así cargarse, como máximo con cierto número de gramos de agua, el que podría llegar a las primeras decenas de gramos de agua cuando la temperatura supere los 20 °C.

El aire descendente se descomprime progresivamente y, por el mismo hecho de esta distensión, se enfría aproximadamente 1 °C por cada 150 metros de ascenso. Resulta de ello que, por esta simple descompresión, la temperatura disminuya con un valor suficiente para que la cantidad de agua contenida en el aire sea excesiva y deba precipitarse. También a veces las variaciones de presión atmosférica, como la presencia de corrientes de aire frío, afectando masas de aire caliente cargado de vapor de agua, son procesos que provocan la precipitación del agua en forma de lluvia o de nieve.

17.2.2 Ecuación del ciclo hidrológico. Pero resulta interesante saber en que se convierten el agua o la nieve así precipitadas sobre el suelo, y cuál puede ser su papel en la formación en las aguas superficiales y subterráneas.

La ecuación del ciclo hidrológico sin considerar aguas juveniles (origen magmático), ni connatas (origen sedimentario), es la siguiente:

$$\text{Pre} + \text{con} = \text{esc} + \text{inf} + \text{eva} + \text{tra}$$

En la ecuación que se señala que el volumen de agua de la precipitación (Pre) más la el de la condensación (con), es igual a la suma de las aguas de la escorrentía (esc), la infiltración (inf), la evaporación (eva) y la transpiración (tra).

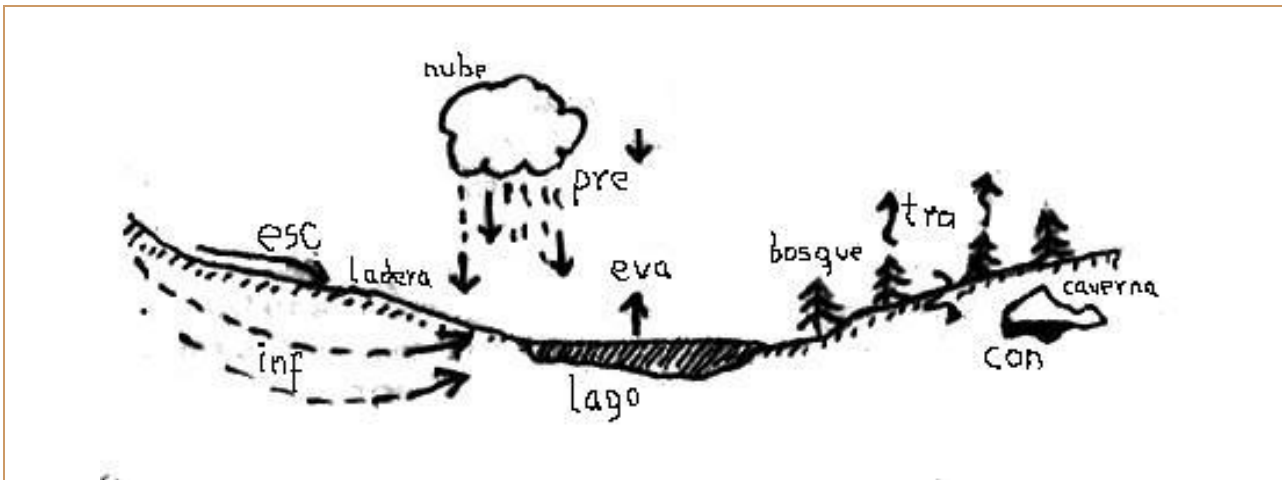


Figura 109. Ciclo hidrológico: las aguas de precipitación (Pre), como también la condensación (con), generan escorrentías (esc), infiltración (inf), y evapotranspiración (eva + tra). Adaptado de Lisandro Beltrán, curso de flujo en medios porosos, U. Nal.

La condensación, que suele ser excluida de esta ecuación, en los bosques de niebla del medio tropical andino y en las cavernas calcáreas de las zonas semidesérticas, es tan importante como lo es la precipitación en otros escenarios. La formación de las aguas subterráneas y en el papel regulador de los bosques de niebla, se comenta en el capítulo de las aguas subterráneas. Los bosques son necesarios para reducir la escorrentía y favorecer la condensación: sin ellos, surgen el descontrol hídrico y pluviométrico, además de la erosión intensa y extensa, y de la pérdida de las aguas subterráneas que alimentan los manantiales. .

La nieve puede acumularse, si la temperatura es suficientemente baja, para formar los glaciares. Estas aguas acaban por volver al estado líquido cuando la presión de los hielos sobre el suelo subyacente aumenta o cuando en verano la temperatura se eleva. En invierno como en verano una parte de estas masas de nieve o hielo se evapora sin pasar por el estado líquido.

Cuando el agua se precipita sobre el suelo en forma de lluvia, lo que es el caso más frecuente, se reparte en tres fracciones. Una parte se evapora y repite nuevamente otro ciclo del agua. Esta evaporación puede ser inmediata o diferida por la intervención de los seres vivos animales o vegetales. Una segunda parte se infiltra para servir a la alimentación de las aguas subterráneas. Una tercera parte, finalmente, fluye y se reúne con los cursos de agua que regresan al mar.

- **La evaluación del ciclo.** Es difícil definir la fracción de agua de lluvia evaporada, particularmente cuando se trata de suelos cubiertos de vegetación. Es igualmente difícil evaluar la fracción de infiltración, que depende considerablemente de la permeabilidad de los terrenos encontrados. La sola medida segura es la de la fracción

de arroyamiento, o agua de escorrentía, que se establece por la estimación de los caudales, durante un período bastante largo, de los cursos de agua cuya cuenca vertiente pueda ser definida con suficiente precisión.

La parte respectiva de las tres fracciones, evaporación, infiltración y escorrentía, cuyo total representa la masa de agua realmente precipitada es así muy variable. La infiltración depende de las condiciones de precipitación, por ejemplo, las lluvias finas y prolongadas se infiltran más que las lluvias de tempestad.

La naturaleza del terreno desempeñará también un papel importante. La infiltración será total en una red cárstica, pero la circulación interna muy localizada, permitirá la restitución a menudo rápida de las aguas subterráneas a los valles. El agua de fusión de las nieves y de los hielos se infiltrará más cuando la fusión sea lenta (invierno) que, por ejemplo, en primavera o verano cuando los caudales aumentan bajo la acción de la radiación solar intensa.

La cobertura vegetal del suelo, que favorece la evaporación, facilita de pronto la infiltración a expensas de la circulación. Pero lo que queda por discutir es la fracción de las aguas de condensación interna y externa dentro de la ecuación del ciclo hidrológico. Se alude aquí a la pérdida de agua que sufren las masas de aire cargadas de vapor, al contacto con la superficie del suelo (nieblas de regiones húmedas y rocíos de regiones secas) o de masas de aire que circulan cavernas profundas aportando agua por condensación y no por adsorción (redes cársticas y macizos fisurados). Los bosques de páramo condensan grandes volúmenes de agua, cuya cuantía compite con la de la precipitación, en los caudales del arroyamiento.

17.2.3 La erosión del suelo. Todo suelo que no está protegido por un manto vegetal, natural o artificial, es presa de la erosión por los agentes atmosféricos y está amenazado de desaparición si nada detiene el agua que cae sobre el suelo, ésta discurre por las pendientes, las erosiona, provoca una crecida de los arroyos y los ríos se desbordan. En estas circunstancias los mantos de aguas subterráneas no estarán alimentados porque no se absorbió parte del agua que cayó sobre el suelo, razón por la cual el nivel de los pozos baja y las fuentes se secan. Si queremos mantos de agua subterránea hay que mantener en el suelo una cubierta vegetal que impida la erosión.

Hay otra forma de erosión diferente a la que producen en los suelos los agentes atmosféricos, la lluvia y el arroyamiento. Se trata de la tendencia que tienen las corrientes de aguas pequeñas o grandes a profundizar su lecho, a llevar más lejos su nacimiento, y, por lo tanto, a modificar el relieve, a esculpirlo. Esta destrucción del material litológico puede tener consecuencias perjudiciales si el río, en período de crecida en lugar de depositar limos finos, viene a recubrir los campos de materiales gruesos, como arenas, guijarros e incluso pedruscos.

Si el mismo fenómeno se produce aguas arriba de los grandes embalses, no tarda en cegarse el depósito de retención. Las curvas de distribución o concentración de aguas en el tiempo, de lluvias y caudales, sirven para el diagnóstico del estado de una cuenca, puesto que el descontrol hídrico y pluviométrico, van de la mano entre sí, y con el nivel y tipo de cobertura del suelo.

17.2.4 La erosión en zonas de ambiente tropical andino.

Los Andes son cordilleras jóvenes con suelos inestables, ambiente tectónico y volcánico. En el trópico predominan los suelos residuales y el clima húmedo con dos temporadas de lluvia al año. De acuerdo a las experiencias de la región, algunos de los factores de la erosión y prácticas de prevención son:

- **Factores físicos de la erosión.** La topografía abrupta, la roca blanda o con intensa alteración tectónica, los altos contenidos de humedad en el suelo por intensa precipitación o elevada humedad relativa, las pendientes fuertes de los cauces, la acción de las aguas de escorrentía en suelos sin protección y la infiltración en temporada de invierno, el vulcanismo, el tectonismo y los terremotos.

- **Factores antrópicos de la erosión.** La tala y quema de la vegetación natural en zonas de ladera, la construcción de carreteras y caminos sin obras de drenaje, los taludes de lleno dispuestos sobre laderas no tratadas y empinadas, la concentración e infiltración de aguas lluvias sobre las laderas, la pérdida de vegetación y en especial la de sistemas radiculares profundos para laderas de fuerte pendiente, las aguas servidas y sin control sobre las laderas habitadas, los botaderos en zonas urbanas y suburbanas afectando drenajes artificiales y cauces, los cortes para adecuación de lotes sin manejo geotécnico, las explotaciones agropecuarias sin prácticas de conservación del suelo, la falta de programas de educación, capacitación y concientización para que las comunidades se apropien debidamente el territorio.

- **Estabilización de taludes.** Conformación de taludes por banqueo en módulos de tres a seis metros de altura con inclinación 1v:1h a 1v:4h. Entre talud y talud van terrazas con bermas con obras de drenaje que conducen las aguas a sistemas colectores. Obras complementarias como muros en concreto armados, en gaviones, en mampostería con malla eslabonada o en tierra armada. Drenaje subterráneo para disminuir la presión de poros del subsuelo y abatir el nivel freático; entre estas obras se destacan: el drenaje con zanjas filtrantes, los drenes horizontales de penetración, contruidos con equipo especial o con palabarreno, el sellamiento de grietas utilizando suelos arcillosos e incluso cal, la impermeabilización de bermas, los empradizados. Pero estas obras son costosas y suponen la erradicación de árboles y arbustos, con lo cual se pierde la resistencia al corte del suelo en las potenciales superficies de falla, y se facilita el agrietamiento por secamiento del suelo ya desprovisto de vegetación multiestrato.

- **Control y manejo de aguas.** Canales en la corona de los taludes para captar escorrentías, conductos cerrados y alcantarillas para disipar y disponer las aguas en cauces y quebradas. Canales contruidos en cauces y quebradas y a través de las laderas; pueden ser en concreto, en gaviones o en mampostería. Presas correctoras contruidas en gaviones para amortiguar la torrencialidad y proteger márgenes de cauces. Trinchos para corrección de cauces, contruidos en guadua y tierra acomodada, acompañados de estacas vivas de sauce, caucho o quiebrabarrigo. Pero las obras de concreto son perecederas, pesadas y costosas, por lo que debe

evaluarse la posibilidad de recurrir a la construcción de trinchos vivos y al restablecimiento de los bosques de galería.

Estructuras de disipación a lo largo de alcantarillados de gran pendiente y en entregas de canales y colectores (resaltos, impacto, vórtice, de caída, rejillas, etc.), construidas en concreto o gaviones. Sumideros de varios tipos a saber: de rejillas de fondo en forma de L, transversales o simples, de captación lateral con o sin rejilla, combinados de rejillas de fondo y captación lateral. Pavimentos en placa de concreto o asfalto impermeable, en zonas peatonales las escalas son al tiempo canales de conducción.

17.3 CORRIENTES SUPERFICIALES

Los ríos van al mar y éste nuevamente los provee de agua. Un río es una corriente de agua continua o perenne, intermitente o no, que desemboca en el mar, en otro río (afluente) o en un lago (emisor) o que pierde por el terreno (endorreísmo).

Los ríos se caracterizan por poseer en general un caudal más regular que los torrentes, a causa de la longitud superior de su recorrido y al aporte de las aguas subterráneas.

Como modeladores del relieve los ríos son los agentes geológicos más importantes, ya por la acción geológica que realizan, ya por la extensión de las áreas sobre las que actúan. Como las características de erosión y sedimentación van variando y en consecuencia también las formas erosivas y de acumulación, clásicamente se han dividido los cursos fluviales en tres partes: tramo superior, tramo medio y tramo inferior.

El río principal con todos sus afluentes, constituye una red fluvial, también llamada cuenca hidrográfica. El caudal de un río depende de las fuentes que lo alimentan, de la cuantía de las precipitaciones y aguas de deshielo, del grado de permeabilidad de los terrenos que atraviesa -en regiones cársticas son frecuentemente los ríos subterráneos- del coeficiente de evaporación, etc.

Se llama régimen de un río a la evolución habitual del caudal de un río en el curso de un año (procedencia de las aguas que lo alimentan, régimen nival, pluvionival, periodicidad de sus aguas altas y bajas, grado de regularidad de su caudal, etc.).

Colombia es, después de Canadá, ex URSS y Brasil, el cuarto país en el mundo por la densidad de sus recursos hídricos continentales. Los grandes desniveles dan origen a rápidos y cascadas aprovechables para la producción de hidroelectricidad. La regulación y canalización permite hacerlos navegables en tierras más bajas, fijar su curso, evitar la peligrosidad de sus crecidas, sanearlos, mejor y más constantemente utilización de sus aguas, etc.

En Colombia pueden hacerse navegables el Magdalena desde Honda-La Dorada a Cartagena y Barranquilla, el Atrato desde Quibdó a Urabá, pero también el Meta y Guaviare para implementar la hidrovía del Orinoco y el Putumayo para entrar a la hidrovía del Amazonas; ya que ambas cuencas cubren el 46,7 % de Sudamérica.

Tabla 21. Principales ríos del mundo con su cuenca.

Río	Longitud Km.	Area cuenca Km. ² x 10 ³	Ubicación	Desembocadura
Nilo	6680	3349	África	Mar Mediterráneo
Amazonas	6516	7050	América del Sur	Océano Atlántico
Mississippi- Missouri	6021	3221	América del Norte	Golfo de Méjico
Yenisei	5540	2580	Unión Soviética	Mar de Kara
Changyang	5490	1959	China	Mar de China oriental
Obi-Irtish	5410	2975	Unión Soviética	Mar de Kara
Congo	4700	3459	África	Océano Atlántico
Lena	4400	2490	Unión Soviética	Mar de Laptev
Mackenzie	4241	1841	América del Norte	Mar de Beaufort
Niger	4180	1890	África	Golfo de Guinea
Río de la Plata- Paraná	4000	4144	América del Sur	Océano Atlántico
Murray-Darling	3780	1057	Australia	Océano Indico
Volga	3690	1360	Unión Soviética	Mar Caspio
Zambeze	3540	1330	África	Canal de Mozambique
Río Grande del Norte	3040	445	América del Norte	Golfo de Méjico
Ganges- Brahmaputra	2897	1621	India y Bangladesh	Golfo de Bengala

La Tierra. Círculo de lectores, 1985.

17.3.1 Partes de un sistema de drenaje. Los ríos resultan de la unión de las aguas de los torrentes. Las líneas que forman los puntos más altos de relieve son las divisorias, quienes distribuyen hacia uno y otro lado las aguas de las precipitaciones. La zona geográfica que alimenta a un mismo río está limitada por dos divisorias y se denomina cuenca hidrográfica.

Un río de montaña se alimenta con el agua de los arroyos confluentes en las zonas de recepción, donde se forman torrentes que llevan agua rápida al valle principal. Aquí la velocidad disminuye y el sedimento se deposita en un cono aluvial o de deyección. En consecuencia, en los torrentes fluviales pueden distinguirse claramente el tramo alto, el medio y el inferior, los que reciben los nombres de cuencas de recepción, canal de desagüe y cono de deyección.

En la cuenca tributaria o de recepción, se concentran las aguas que provienen de la fusión de la nieve o de las tormentas. Como la pendiente es fuerte y la vegetación escasa, la erosión actúa con intensidad. La forma de la cuenca es triangular, con un vértice en la parte más baja y formada por numerosos barrancos que confluyen unos con otros hasta formar un único cauce, el canal de desagüe.

El canal de desagüe corresponde al recorrido más largo del torrente. La principal acción geológica es el transporte, pero también se producen erosión y sedimentación. Al final del canal se encuentra el cono de deyección. El cono de deyección se forma en el valle de salida, por los sedimentos que deja el río cuando pierde velocidad. Este cono inestable tiende a suavizar el cambio de pendiente entre la ladera de la montaña y el fondo del valle.

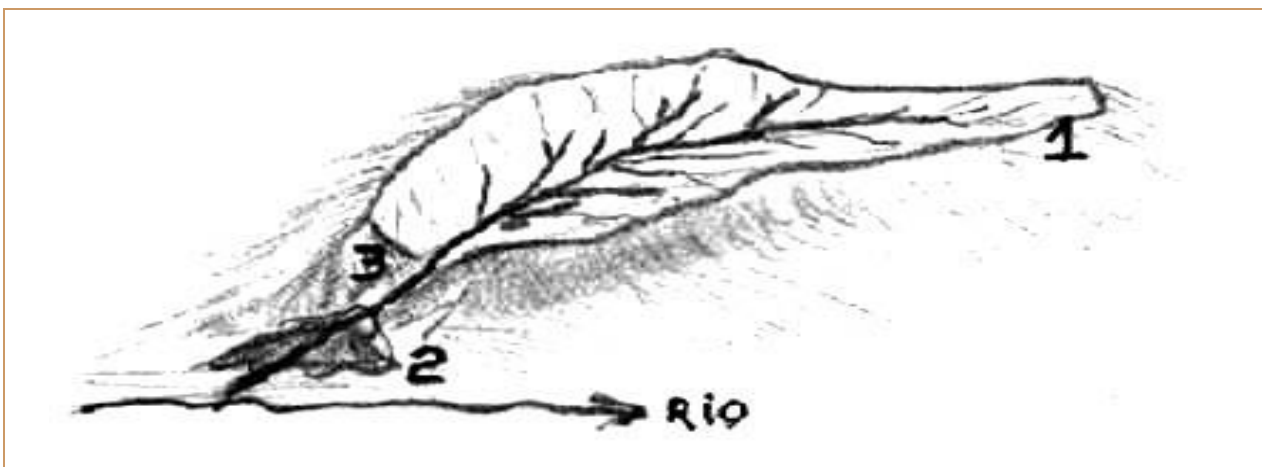


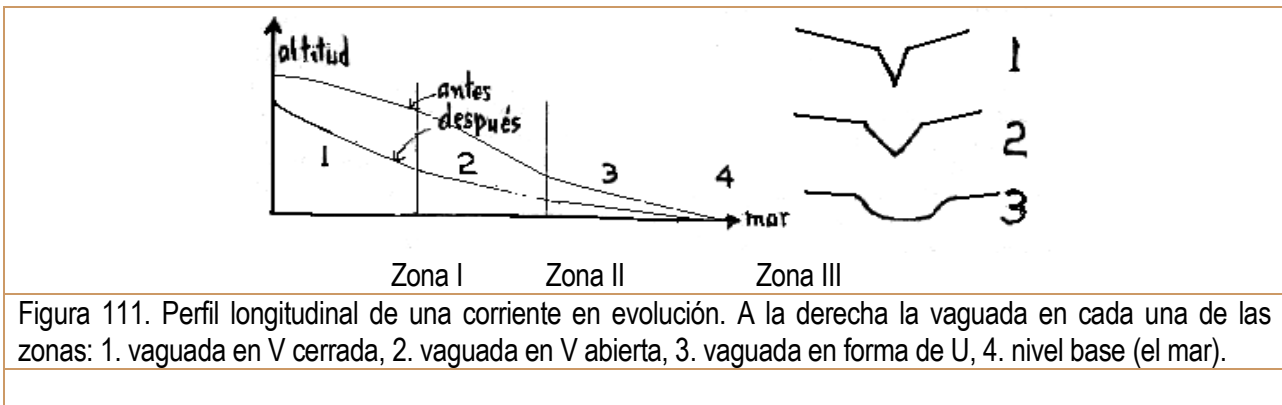
Figura 110. Sistema de drenaje. Se ilustra en 1 la cuenca tributaria o de recepción, en 2 el cono de deyección y en 3 el canal de conducto o desfogue uniendo las partes anteriores. Por orden de afluencia los arroyos forman quebradas y éstas, ríos. Adaptado de La Tierra, Salvat.

17.3.2 Perfil de una corriente. Longitudinalmente distinguimos tres zonas en dirección aguas abajo hasta llegar al nivel base; lagos y represas serán niveles bases temporales, pues el último nivel base es el mar.

- **Zona I.** Localizada aguas arriba, es la zona de erosión, predomina la erosión de fondo sobre la lateral; es una erosión lineal vertical que se contrapone a la erosión de área. Es máxima la velocidad del flujo y este tiene características torrenciales; en la carga predominan arenas y guijarros, los alineamientos son bruscos, la vaguada es en V cerrada y los cañones son cerrados. Las estructuras que se producen son formas erosivas, las cascadas y los rápidos son típicos aunque no exclusivos de ésta zona.

- **Zona II.** Localizada en la parte media de la corriente, es la zona de suspensión, muestra equilibrio entre la erosión de fondo y la lateral. La velocidad es moderada y la pendiente más suave; predominan limos y arenas en la carga; el lecho del río se va rellenando con materiales que no puede arrastrar (agradación). Los alineamientos son suaves, el paisaje ondulado y la vaguada en V abierta.

Las llanuras de inundación se desarrollan tanto en el tramo medio como inferior de los ríos. Progresivamente la agradación lleva a una situación de inestabilidad en la que la menor crecida propicia el desbordamiento de las aguas. En el desbordamiento la llanura de inundación recibe aluviones y a los lados del cauce se reconstruyen los umbrales. A partir de éste momento el río nuevamente encajado entre los umbrales recién formados permanece estable durante unos años hasta que el proceso de agradación le lleva a la situación anterior.



Hay características que determinan la formación de meandros en el tramo medio del cauce. El abandono de sedimentos aguas arriba del tramo medio produce depósitos de forma longitudinal denominados barras. El agua fluye entre las barras formando diversos canales que se bifurcan y unen, llamados cauces anastomosados. En la última porción del tramo medio y en el tramo inferior el río transporta sedimentos de grano más fino sobre una pendiente más suave y bajo un caudal más regular.

- **Zona III.** Localizada aguas abajo, es la zona de depósitos próxima al nivel de base o desembocadura. Como la velocidad es lenta, en la carga dominan limos y arcillas; predomina la erosión lateral sobre la de fondo, hay meandros, el paisaje es de valles amplios y la vaguada es en U abierta. La estructura más característica del tramo inferior es la que se origina en su arribada al mar; ésta puede ser libre de sedimentos (estuario) o caracterizada por el abandono masivo, y entonces se produce una acumulación que se conoce con el nombre de delta. Que se origine uno u otro tipo de estructura depende de las características del río y de las zonas costeras, como son la amplitud de la plataforma continental, estabilidad o presencia de movimientos verticales, presencia de mareas corrientes y oleaje y cantidad de sedimentos que el río aporta.

17.3.3 Evolución de la corriente. El trazado de un río desde su nacimiento hasta su desembocadura está caracterizado por un descenso de la pendiente yendo de su nacimiento hasta su desembocadura. En el transcurso del tiempo la labor erosiva va variando el perfil, las pendientes decrecen y cada tramo va adquiriendo progresivamente las características del tramo inferior. Esta evolución hace que la energía del río disminuya hasta alcanzar una inclinación inapreciable, obteniéndose el denominado perfil de equilibrio.

El trabajo del río se efectúa en consonancia con un punto de energía potencial cero que es la altitud del nivel de base o lugar de la desembocadura. Además del nivel de base general que es el mar, los ríos pueden encontrar niveles de base locales, como lo son los embalses de agua de las presas.

- **El relieve también evoluciona.** En las áreas sometidas a la acción de torrentes y ríos, los relieves con el tiempo se van suavizando en función de los niveles de base hasta la situación hipotética en la que los ríos alcanzan sus perfiles de equilibrio y toda el área se transforma en penillanura (llanura erosiva suavemente inclinada hacia el mar).

Las aguas corrientes ejercen un papel en la preparación y evolución de las formas del relieve continental. Las formas elementales primitivas, de las zonas emergidas por orogénesis y epirogénesis, son atacadas inmediatamente por las aguas meteóricas y el arroyamiento. Las aguas salvajes ejercen una acción de erosión, de horadación, que determina la constitución de una red hidrográfica que colecta las aguas de arroyamiento. Estas aguas corrientes transportan los materiales arrancados al relieve y terminan por depositarlos en el camino; los más finos en el mar.

- **Perfil de equilibrio de la corriente.** La erosión regresiva sigue teóricamente hasta que se establece un perfil de equilibrio, pero aquella no se detiene en la cumbre de una superficie inclinada ya que hace retroceder su nacimiento más allá, y al horadar su lecho alcanza la otra vertiente para que terminen por encontrarse las vaguadas y se provoque de éste modo una captura y el abandono de las gargantas. Este abandono y captura es muy notable en la cordillera de los Andes entre Chile y Argentina, donde el eje montañoso andino muy próximo al Pacífico ha sido duramente atacado por la erosión regresiva de los ríos de Chile, rechazando de éste modo la

línea de los puertos hacia el Este, hacia Argentina. Este retroceso ha alcanzado a veces 200 Km. con consecuencias políticas entre los dos países, puesto que la frontera natural se hace móvil hacia Argentina.

- **Cambios de nivel de base de la corriente.** El nivel de base final de una corriente es el mar, que puede presentar cambios en el largo plazo por movimientos eustáticos, y por modificaciones del clima global. Pero también se pueden tratar cambios en niveles de base más altos que el nivel del mar; estos cambios pueden presentar dos posibilidades: descenso del nivel base por proceso erosivo como en el caso de fallas y elevación del nivel base por proceso de sedimentación como en el caso de presas.

En el primer caso la falla produce una catarata que se transforma en rápido, posteriormente el río suaviza su perfil descendiendo; en el segundo caso, el lago tras la presa termina sedimentado y transformado en depósito, para que la corriente fluya sobre él. Las Cataratas del Niágara han ido retrocediendo varios Km. en los últimos milenios, a velocidades diferentes de acuerdo a la dureza de la roca en cada sector.

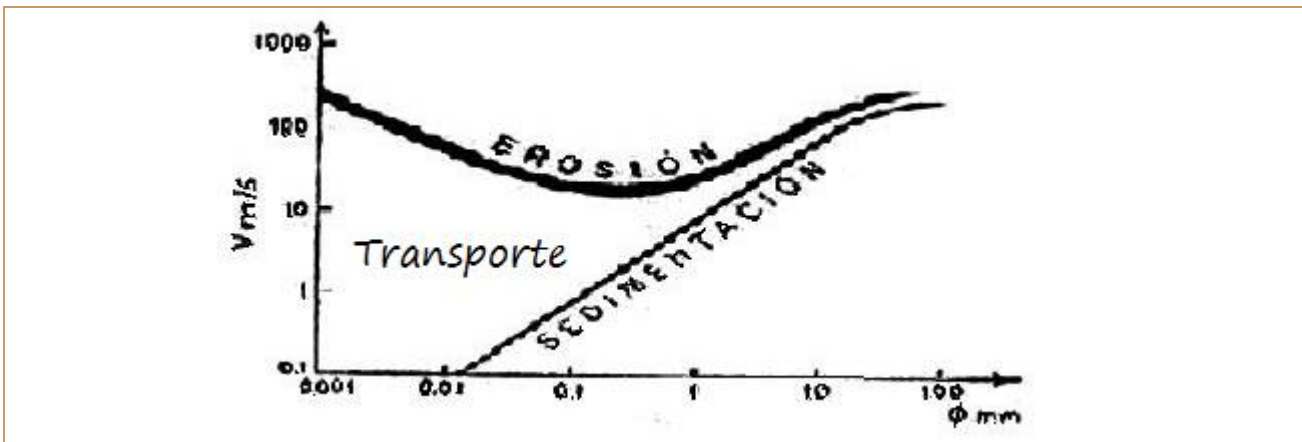


Figura 112. Curva de Hjulström; sedimentación V.S erosión de una partícula de diámetro D mm dado, según la velocidad V cm/s de la corriente. En medio de las dos curvas, el sector izquierdo, es la zona de transporte. La zona izquierda del gráfico corresponde a las arcillas, y la derecha a las gravas. Las arenas son más susceptibles a la erosión

Intervenir una corriente, con un dique por ejemplo, supone modificar sus condiciones de sedimentación y transporte: aguas arriba se presentará un fenómeno de sedimentación remontante, a causa de la elevación del nivel de base, mientras aguas abajo se observará el cambio a una granulometría gruesa, por un fenómeno denominado acorazamiento del cauce.

17.3.4 Deltas. Los deltas se forman cuando un río penetra en el mar o en un lago y toda su carga se sedimenta formando un montículo extenso y de suave pendiente que al ir creciendo obliga al río a fluir sobre él para llegar a la desembocadura. Los deltas se presentan en regiones de regresión marina, donde el continente le gana espacio al mar, y no donde las corrientes se llevan los sedimentos.

Cuando las corrientes llegan al último nivel base (mar), los depósitos forman deltas, con canales distributarios que se orientan perpendiculares a la playa, o paralelos a ella, según la fuerza de la corriente del río, enfrentada a la fuerza del oleaje, sea mayor o menor respectivamente. Sobresalen en Colombia, el delta del Magdalena en la costa norte y del Patía en el Pacífico.



Figura 113. Deltas de una corriente: 1. canales paralelos a la costa, 2. canales paralelos al río.

17.3.5 Abanicos. Los abanicos o conos aluviales son depósitos formados en la intersección de la montaña con el valle de salida de los ríos. Estos depósitos se dan cuando la fuerza de la corriente pasa bruscamente de fuerte a suave. Por ejemplo, el abanico de Ibagué se forma en el piedemonte de la cordillera Central, donde el río Combeima sale al valle del Magdalena.

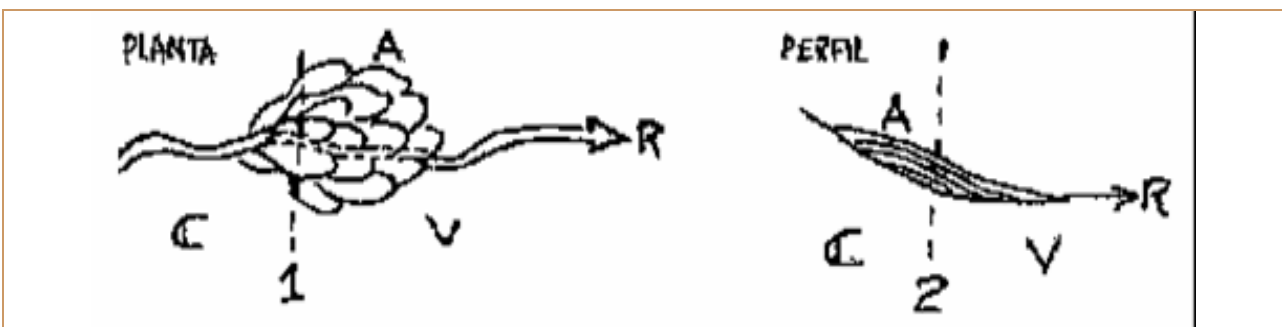


Figura 114. Abanicos aluviales: 1. planta del abanico, 2. perfil del abanico: C. cordillera, V. valle de salida, R. río, A. abanico.

17.3.6 Valles. Un valle se forma por dos procesos. El río va excavando la tierra arrancando una estrecha franja de roca de su lecho, y de éste modo produce un perfil en V. Posteriormente la meteorización ensancha el valle transformando las rocas que forman los márgenes del suelo. Al disminuir la velocidad del agua la erosión lateral ensancha el fondo del valle. En su estadio avanzado el río discurre lentamente sobre un llano aluvial en el que el material depositado forma diques laterales.

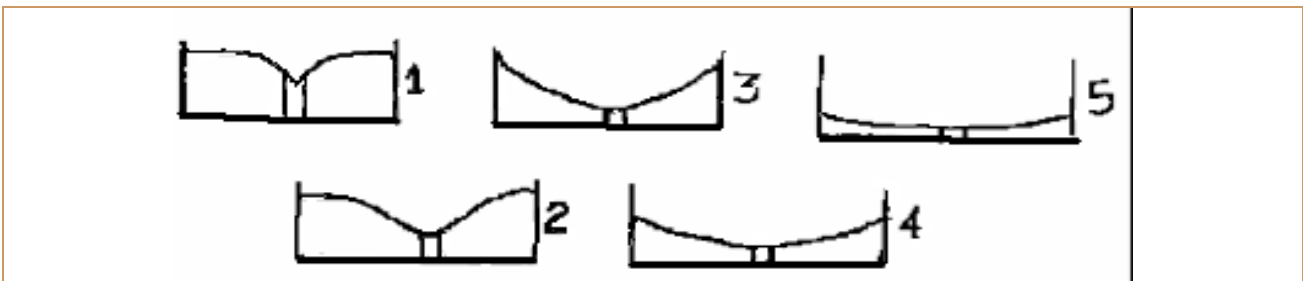


Figura 115. Formación de un valle. Se muestra en cinco etapas la evolución de un río en un macizo homogéneo, hasta formar un valle. De existir anisotropía oblicua, el perfil resulta de laderas asimétricas y la corriente emigra lateralmente. Según de La Tierra, Salvat.

17.3.7 Terrazas. Es una franja de tierra plana situada a lo largo de la pared del valle justamente sobre el valle de crecidas. Una terraza se forma cuando sube la tierra o baja el nivel del mar y el río empieza a cortar su llano de crecidas para formar otro nuevo a un nivel más bajo. El viejo llano de crecida se convierte así en terraza. Otro levantamiento producirá una nueva terraza y el paisaje se mostrará escalonado como en la fig. 116.

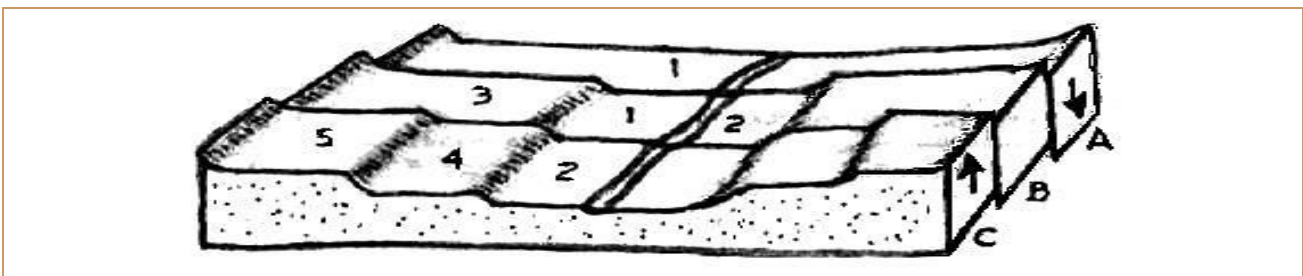


Figura 116. Formación de una terraza aluvial: A, B y C representan el valle del río desde antes hasta después de su elevación. 1 y 2 llanos de crecida, 3, 4 y 5 terrazas.

17.3.8 Corrientes trenzadas y corrientes con meandros. Cuando los ríos encuentran los valles de salida, suelen presentar corrientes trenzadas, particularmente aquellos ríos que arrastran gran cantidad de sedimentos, cuyo cauce deriva de izquierda a derecha entre una u otra época de avenida. Es el caso de los ríos de la cordillera Oriental, en su llegada al llano.

Más adelante, cuando se encuentran en valles amplios, los ríos son lentos, se favorecen los depósitos, que hacen serpentear la corriente; los meandros se producen si hay poca pendiente, pero el agua puede romper los meandros dejando sus vestigios, los que marcan el área de influencia del río, para recuperar viejos canales. En una curva del río el agua va más lenta por la margen interior y erosiona por la contraria para acentuar el meandro, hasta que se produce una intersección de dos curvaturas que permitan al flujo seguir un camino más corto.

El caso más significativo en Colombia es el de Mompox, población que ha quedado hoy a unos treinta km. por la margen derecha del Magdalena.

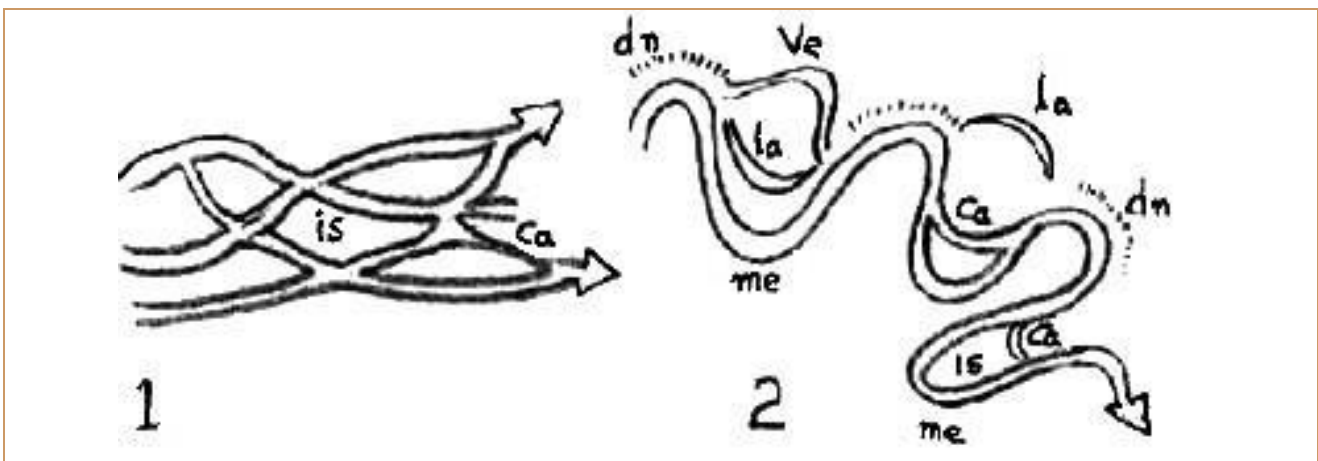


Figura 117. Corrientes aluviales. 1. Corrientes trenzadas, 2. Corriente con meandros. Para ambos dibujos, los códigos son: dn. Diques naturales, ca. Canales, ve. Vestigio de meandro, is. Isla de aluvión, la. Lago en medialuna, me meandro.

17.4 DINAMICA FLUVIAL

La comprensión de los fenómenos erosivos del suelo y de las crecidas e inundaciones, como también de los fenómenos de disolución supone el conocimiento de ciertos procesos dinámicos de las corrientes de agua. Las obras de ingeniería no pueden diseñarse sin atender la naturaleza de estos procesos.

17.4.1 Flujos. Un flujo puede ser laminar o turbulento, en el primero las líneas de flujo son paralelas, ellas suponen que la velocidad de cada una de las partículas es la misma velocidad en las secciones transversales, y esa velocidad es relativamente constante.

En el flujo turbulento las líneas de corriente se cruzan; ello se puede deber a aportes o pérdidas en el flujo, a fricción lateral o de fondo, a variación en la sección del canal o a cambios en la pendiente o en la dirección del canal. Los flujos lentos, por regla general, son laminares, y los flujos rápidos, turbulentos.

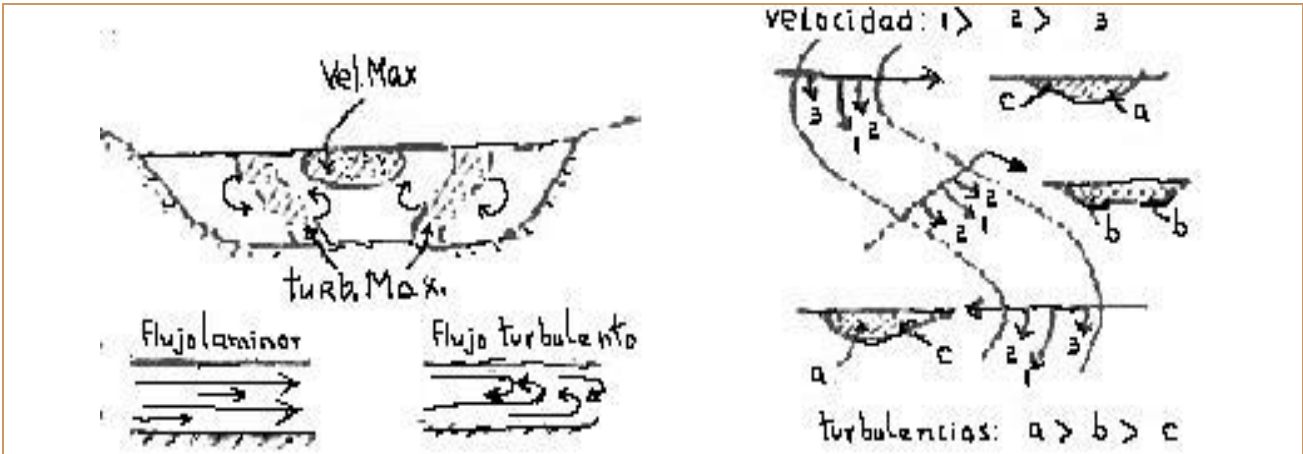


Figura 118. Líneas de flujo en una corriente. Distribución de turbulencias y velocidades en una corriente. A la izquierda perfiles y a la derecha planta con tres cortes transversales. Adaptado de Corrección de Torrentes y Estabilización de Cauces, F. López.

17.4.2 Concepto de velocidad terminal

Es la máxima velocidad V_t que alcanza un cuerpo en caída libre dentro de un fluido en reposo, es decir, cuando su aceleración se hace nula debido a que la fricción contrarresta el efecto de la gravedad.

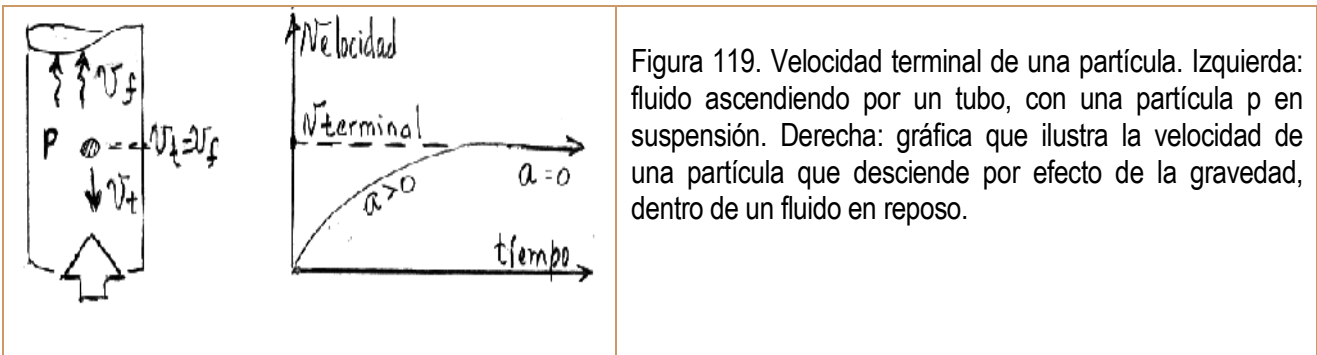


Figura 119. Velocidad terminal de una partícula. Izquierda: fluido ascendiendo por un tubo, con una partícula p en suspensión. Derecha: gráfica que ilustra la velocidad de una partícula que desciende por efecto de la gravedad, dentro de un fluido en reposo.

Si por un tubo asciende un flujo con velocidad $V_f = V_t$, cualquier partícula, que tenga por velocidad terminal V_t y que se encuentre dentro del tubo, quedará en suspensión y en reposo dentro del fluido, a menos que la velocidad del fluido cambie.

17.4.3 Capacidad, carga y competencia. Se entiende por carga la cantidad de material que lleva una corriente en un momento dado; por capacidad, la máxima carga que puede llevar la corriente, y por competencia el tamaño máximo de partículas que puede mover la corriente.

El diámetro de las partículas levantadas por un flujo aumentará (y por lo tanto la competencia y la capacidad) con el cuadrado de la velocidad del flujo, y con su cubo, si el flujo es altamente turbulento.

La erosión es débil en las rocas duras y compactas. Sin embargo actúa con el tiempo y lo hace activamente sobre las rocas blandas pero coherentes, como las arcillas, las arenas y los suelos de cultivo. Los granos arrastrados en primer lugar no son necesariamente los más finos. Los materiales arcillosos y coloidales, cuyas partículas miden de 1 a 100 micras, resisten mejor la erosión que las arenas homogéneas, cuyos granos tienen entre 200 micras y 2 mm. La erosión se ve facilitada si el material no es homogéneo como ocurre con los suelos cultivables.

Una de las acciones prioritarias en relación con la problemática de la erosión de las laderas y la consecuente sedimentación de las corrientes, es la solución de los conflictos entre uso y aptitud del suelo, la recuperación de las áreas de interés ambiental incluyendo en ellas los bosques de galería, el control de los procesos de potrerización y la implementación de prácticas silvopastoriles y agroforestales.

17.4.4 Modos de transporte de una corriente.

Estos son disolución, suspensión y carga de fondo.

- **Disolución.** Al mar llegan por año 3000 millones de toneladas, expresadas en sales, carbonatos de Ca, Mg, etc. Los fenómenos de disolución en las calizas son muy clásicos y espectaculares, pero existen otros en el yeso que no son menos inquietantes al considerar la cimentación de las grandes obras.

- **Suspensión.** Por el concepto de velocidad terminal, pueden mantenerse partículas en suspensión dentro de un fluido en movimiento, levantadas por líneas de turbulencia del flujo.

- **Carga de fondo.** En el fondo del cauce predomina la carga depositada sobre la carga que va en suspensión; esas partículas se mueven por saltos, por deslizamientos o rodando, gracias a la presión y empuje del flujo.

17.4.5 Formas de erosión en las corrientes

- **Levantamiento directo.** Es el que provoca la turbulencia al colocar carga en suspensión. A mayor velocidad del flujo, mayores diámetros se levantan.

- **Abrasión.** Es el efecto de lija de la carga sobre las paredes y el fondo. Los materiales duros pulen el lecho, mientras los blandos resultan pulidos para explicar los cantos rodados.

- **Cavitación.** Desconchamiento de fragmentos de roca provocado por el hundimiento de vacuolas -colapso de burbujas de vapor en flujos turbulentos que generan presiones entre 100 y 150 atmósferas- en corrientes muy rápidas cuando la presión estática del líquido queda hundida bajo la presión del vapor.

En los túneles de carga de los proyectos hidroeléctricos, para evitar la cavitación, suele inyectarse aire bien distribuido a lo largo del flujo. No obstante la construcción a escala del embalse puede advertir sobre la incidencia de la geometría del terreno y obras anexas a este, en la formación de vórtices o remolinos que incorporen aire a los flujos. En tales casos, se deben modificar la topografía del terreno o las estructuras de captura del flujo en los diseños hidráulicos.

- **Impacto y disolución.** En la zona alta de un río (zona I), por la alta velocidad, o en las cascadas y rápidos, es frecuente el impacto del flujo. La disolución de las rocas, por donde transcurre la corriente, se favorece en calizas, mármoles y dolomías, también en concreto.

- **Denudación.** Erosión superficial de las aguas de escorrentía agravada por tala, quema y azadón; especialmente cuando las pendientes superan los 15 grados. Los terrenos desnudos quedan desprotegidos y a merced de la erosión superficial. Esta erosión tiene tres niveles, el laminar menos severo, el de surcos o intermedio y el de cárcavas o severo.

- **Épocas de avenida.** Por mal uso o mal manejo del suelo, se intensifican las avenidas de las corrientes. Primero se tala el monte, luego se siembra; deteriorado el recurso, el uso siguiente es el pastoreo; y deteriorado por erosión, finalmente entra el suelo al proceso de desertificación. El resultado es el descontrol hídrico y pluviométrico por el cual en el verano los ríos se secan y en el invierno se desbandan.

17.4.6 Formación de aluviones. Cuatro principios físicos explican la formación de los depósitos de corriente o aluviones.

- **Primer principio.** Para granos de la misma forma la acción de una corriente es función de su densidad y del diámetro y volumen de la partícula. Si son esferas menores que 1/10 mm, se asientan siguiendo la ley de Stokes, y si supera las 3/100 de mm, se aplica la ley del impacto. Esto es:

$$\begin{aligned} v &= (2/9) gr^2 (d - d') / C && \text{(Stokes)} \\ v &= (d - d') r^2 && \text{(Stokes)} \\ v &= 2 Kr (dd') && \text{(Impacto)} \end{aligned}$$

Donde v es la velocidad de caída, g la aceleración de la gravedad, r el radio de la partícula, d y d' las densidades de la partícula y el fluido, respectivamente; C es la viscosidad del líquido y K una constante. De ser las partículas de forma y tamaño iguales, se asentarán primero las más densas; pero la clasificación por tamaños y la selección por densidades actúan simultáneamente, no sólo en la vertical sino también a lo largo de planos inclinados.

- **Segundo principio.** Una partícula se desplazará más lejos cuanto más rápida sea la corriente. Al disminuir la velocidad de flujo, se asientan los granos más pesados. Si el flujo es turbulento, tiende a levantar las partículas sólidas. También pueden formarse depósitos donde una corriente rápida desemboca sobre otra más lenta.

- **Tercer principio.** Por el escurrimiento de los granos pesados entre los espacios de los cantos mayores, las concentraciones de materiales pesados tienden a ubicarse en el basamento y en sus rugosidades.

- **Cuarto principio.** El tamaño de los granos suele disminuir desde el fondo hacia la superficie. Dentro del desarrollo del ciclo fluvial de erosión y depositación, la corriente busca el perfil longitudinal de equilibrio. Las variaciones dentro del ciclo, originadas por cambios de clima o movimientos diastróficos, que afectan el perfil longitudinal de la corriente, pueden explicar superposición de ciclos incompletos de sedimentación y presentar una serie de capas de gravas recubiertas por arenas y limos.

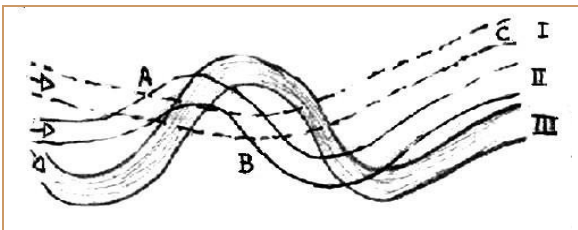


Figura 120. Meandros en cauce sinuoso y corriente rápida. Por migración lateral de la corriente, los depósitos formados en A, B y C, de la etapa I, se extienden lateralmente y corriente abajo durante las etapas II y III. Según Geología Económica de los yacimientos minerales, H. Garcés-González, 1984.

Se denominan movimientos diastróficos a los procesos geológicos que abarcan todos los movimientos Orogénicos y Epirogénicos de la corteza terrestre.

17.4.7 Control torrencial y fluvial. Es importante conocer la capacidad de arrastre de las corrientes, pues tales valores están implícitos en los procesos erosivos de los suelos. Para mover guijarros en las corrientes se requieren velocidades de 30 cm/seg, para el arrastre de arena más de 3 cm/seg, y para limos más de 3 mm/seg.

- **Manejo en la ladera.** En las laderas es importante disipar la energía de los flujos, conduciendo las aguas tranquilamente a través de estructuras hasta entregarlas a las vaguadas. Para tal efecto se usan canales en las laderas, de conformidad con su inclinación, así: canal de fondo liso, si la pendiente es menor del 15%; canal con pantallas deflectoras para pendientes entre el 15% y el 35% colocadas las pantallas a modo de espolones en tres- bolillo, y canales con columpio y rápidas con tapa para pendientes mayores del 35% y hasta el 100%. Los canales escalonados son útiles en pendientes más fuertes y las paredes con dados pueden contribuir a la disipación de la energía en la contrahuella de estas estructuras.

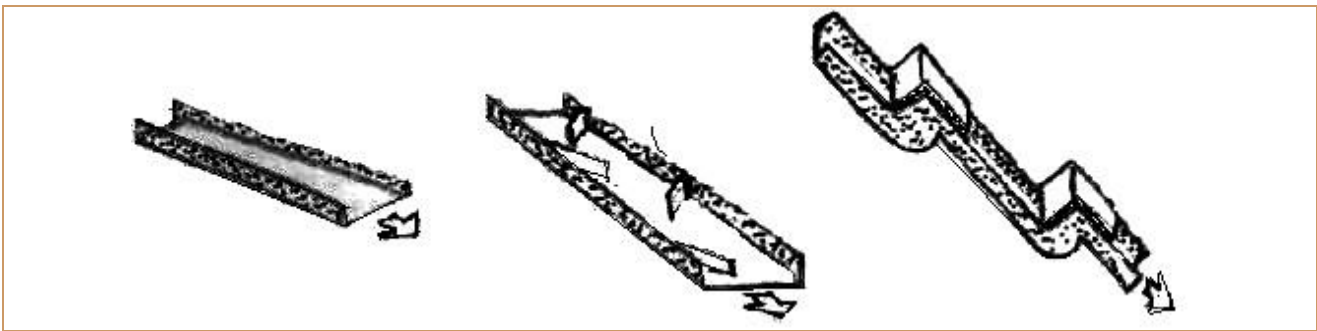


Figura 121. Canales para tratamiento de aguas en laderas: Izquierda, canal liso; Centro, canal con pantallas deflectoras, Derecha, canal con rápida, columpio y tapa. Según Fernando Mejía F., curso de hidráulica, U. Nal.

- **En la vaguada.** Un cauce puede erosionar la vaguada de dos maneras: si hay erosión de fondo se profundiza el cauce y los taludes ribereños pierden estabilidad; en tal caso se recomienda estructuras escalonadas a modo de vertederos, que emulando cascadas permitan establecer perfiles de baja pendiente para que el agua los recorra sin velocidad.

Contrariamente, si hay deposición de materiales en el cauce, por sedimentación se eleva el lecho; así la corriente divaga se recuesta en ambas laderas, erosiona sus patas y las hace inestables; en este caso se recomienda centrar la corriente utilizando espolones en tres bolillo, dispuestos conformes o contrarios a la corriente.

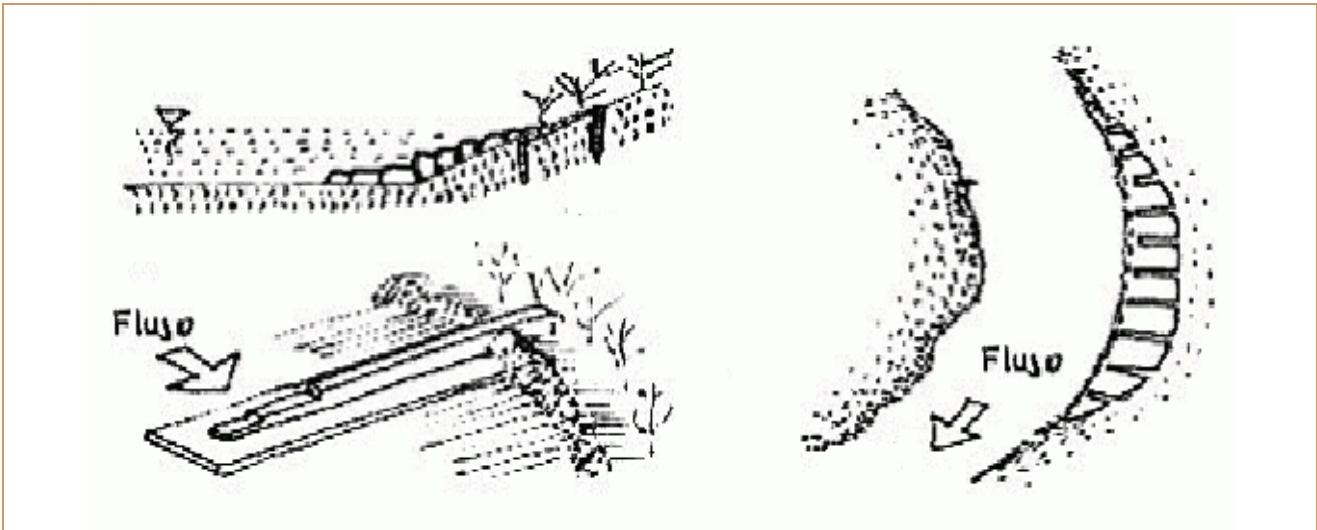


Figura 122. Defensas de las riberas de un río: Para la estabilización del cauce, se construyen espigones (izquierda) en mampostería, concreto u otros materiales, para la defensa de las orillas más erosionadas (derecha). Según F. López. Corrección de Torrentes.

17.5 MORFOLOGIA Y RED DE DRENAJE

La red de drenaje y las formas que se producen están determinadas por la composición y disposición (estructura) de las rocas subyacentes. Los ríos exageran rápidamente cualquier diferencia de dureza de las rocas sobre las que fluyen. Aguas arriba de la corriente en el curso alto las bandas de rocas más resistentes forman cascadas y rápidos cuando los valles se estrechan y si la estratificación es horizontal la topografía estará dominada por colinas de cumbre plana, como ocurre en las vecindades de Honda, Tolima. Pero si están inclinadas las capas la topografía se escarpa y las capas más resistentes forman cuevas de laderas menos abruptas con una inclinación igual al buzamiento de los estratos, mientras que en los afloramientos de rocas más blandas se pueden desarrollar valles de fondo plano según la dirección de las capas.

La red de drenaje puede sufrir cambios menores. Un río determinado puede erosionar el fondo de su valle más rápidamente que su vecino para producir una captura, circunstancia que ocurre cuando en el origen del primer río se dan manantiales de mayor caudal o mayores escorrentías procedentes de las laderas de los valles o se tiene un curso más corto para llegar al mar.

En regiones de rocas suavemente plegadas se puede desarrollar un relieve invertido, en caso de que los valles del río se erosionen en las crestas de los anticlinales y sus sinclinales queden colgados en la parte más elevada. Donde las capas están más plegadas o donde hay rocas ígneas en masas casi verticales se producen cerros escarpados por ambos lados para que los ríos erosionen los cinturones de los estratos más débiles o las líneas de fallas; éste paisaje suele ser visible en la región Supía-Riosucio, Caldas.

17.5.1 Tipos de drenaje o avenamientos. Como las venas de una hoja, los valles fluviales son el medio por el cual el agua se mueve a través de un sistema. El sistema de desagüe se llama cuenca y la separación entre éste y un valle adyacente, interfluvio o divisoria de aguas. Pero los valles individuales forman un sistema de ramificación que, en general, será aproximadamente del mismo tipo que las otras cuencas similares. Así, se pueden encontrar sistemas de corrientes que se escalan en órdenes, siendo los del primero los de aportes más pequeños y los segundos, la combinación de dos de los anteriores. Dos de segundo orden originan un sistema de tercer orden y así consecutivamente. Aunque estas relaciones topológicas tienden a ser constantes otros aspectos de la cuenca de desagüe varían de una cuenca a otra, y así el desarrollo de un sistema de drenaje se constituye en un complicado proceso.

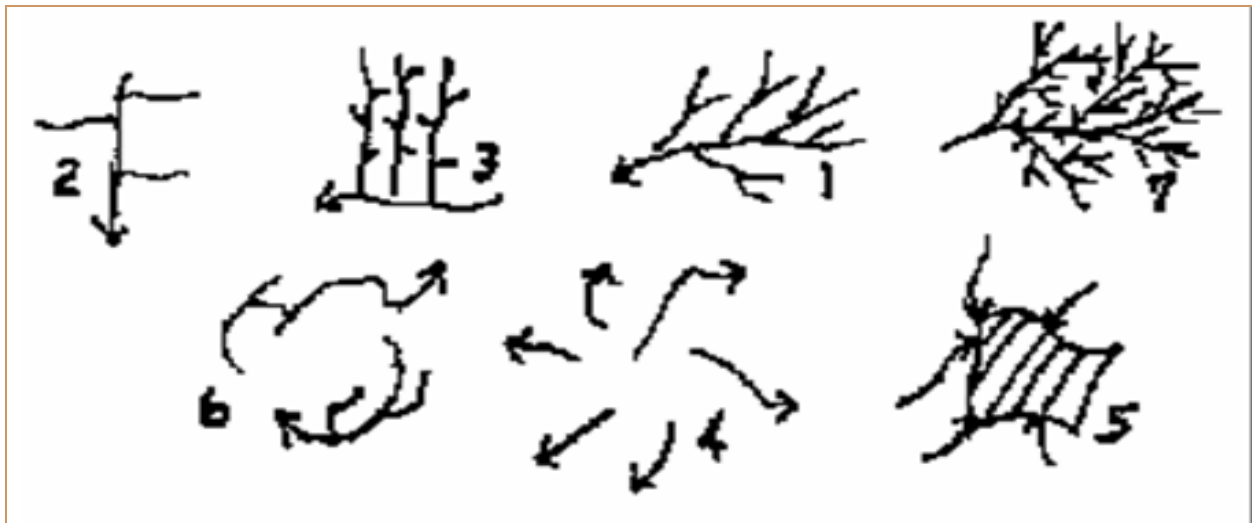


Figura 123. Formas de drenaje: 1. dendrítico, 2. Rectangular o angular, 3. Enrejado o trellis, 4. radial divergente, 5. radial convergente, 6. anular, 7. Arborescente o dendrítico intenso. Adaptado de Engineering Geology, C. Mathewson.

El drenaje se considera entonces así: el avenamiento dendrítico advierte capas no plegadas ni falladas, el arborescente es un caso especial de aquel, que anuncia una roca homogénea muy erosionada; el rectangular se desarrolla sobre rocas cristalinas con un fracturamiento definido; el enrejado advierte que el basamento está plegado, el radial divergente es típico de volcanes e intrusiones erosionadas, el radial convergente es típico de calderas y supone hundimientos de la corteza, el anular anuncia domos salinos e intrusiones ígneas.

17.5.2 Tipos de corrientes. Las corrientes pueden ser consecuentes si su patrón está determinado por la pendiente de las estructuras del basamento; subsecuentes cuando los causes son paralelos al rumbo de los

estratos del basamento; obsecuentes si fluyen en dirección opuesta al buzamiento del basamento; antecedentes si mantienen su curso cortando las estructuras geológicas del basamento (fallas y pliegues); insecuentes si el curso no obedece a las estructuras del basamento y al no incursionar en ellas el cauce es inestable; superpuestas las que habiéndose iniciado sobre una cubierta de rocas la erosionan para descender hasta el basamento y hacerse estables.

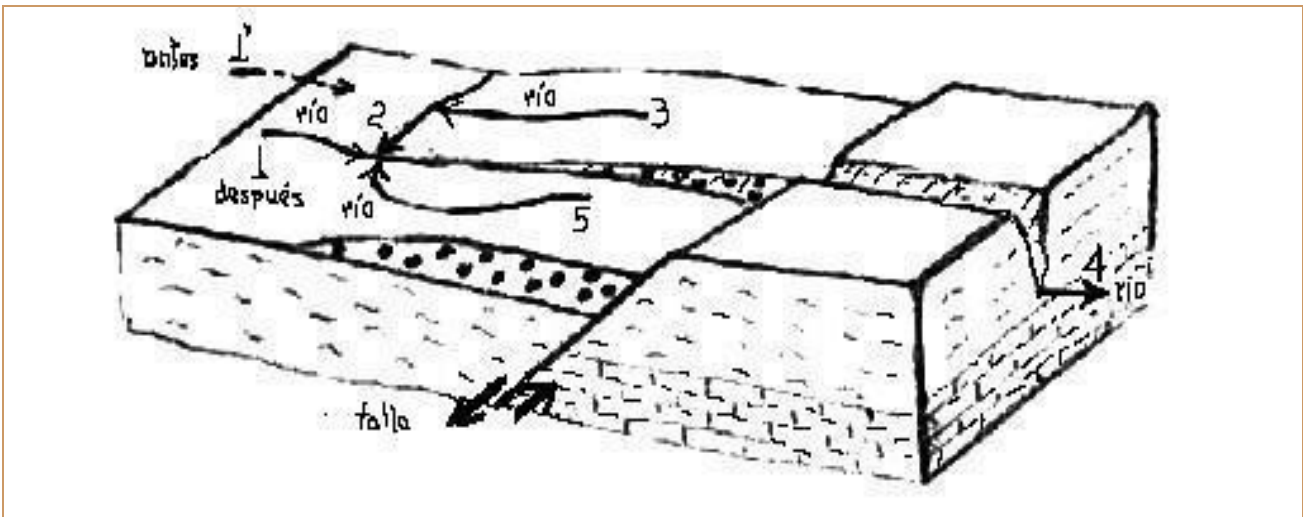


Figura 124. Tipos de corriente: 1. consecuente, 2. subsecuente, 3. obsecuente, 4. antecedentes, 5. insecuentes, 1 y 1' superpuestas. En la fig. Una falla ha desplazado los estratos y la corriente 1' ha descendido al nivel de la corriente 1. Adaptado de Diccionario Ilustrado de la Geología, Círculo de Lectores.

17.6 PRINCIPALES RIOS DE COLOMBIA

Los ríos colombianos de la vertiente del Atlántico (363.878 km²), son el Atrato, el Sinú, el Magdalena, el Ranchería o Calanaca y el Catatumbo. En la del Pacífico (88.000 km²) se encuentran el Baudó, el San Juan, el Micay, el Patía y el Mira, entre otros. Los afluentes de la cuenca del Amazonas (345.000 km²) son el Caquetá, el Vaupés y el Putumayo y los afluentes de la cuenca del Orinoco (328.000 km²) son el Arauca, el Meta, el Vichada, el Tomo y el Guaviare.

Estas vertientes generan un caudal medio de 66.440 m³/seg, distribuidos así: 23% en la del Caribe; 10% en la del Pacífico; 34% en la Amazonía y 32% en la Orinoquía; la del Catatumbo sólo drena el 1% al Golfo de Maracaibo.

Río	Cuenca km ²	Longitud Km	Caudal m ³ /s
Caquetá	99.203	1.200	13.180
Guaviare	166.168	1.350	8.200
Magdalena	257.438	1.543	6.987
Meta	103.052	1.000	6.496
Putumayo	53.165	1.350	6.250
Atrato	35.702	612	4.155
Vaupés	37.748	660	2.650
San Juan	15.180	376	2.550
Vichada	22.235	700	2.000
Mira	10.901	550	570

Cuadro C: Cuencas y caudales de los principales ríos de Colombia. Fuente: <http://www.colombia.com>

- **El río Magdalena.** Es el principal río colombiano, cruza el centro del país y sirve de médula espinal a las comunicaciones de la Nación. Nace en el páramo de Letrero en el Macizo Colombiano y recorre 1538 km. hasta su desembocadura por las llamadas Bocas de Ceniza. Recibe un afluente de gran valía por la cuenca que baña y es el Cauca que riega una de las regiones más ricas de Colombia. La navegación por el Magdalena es viable en naves de poco calado para contenedores.

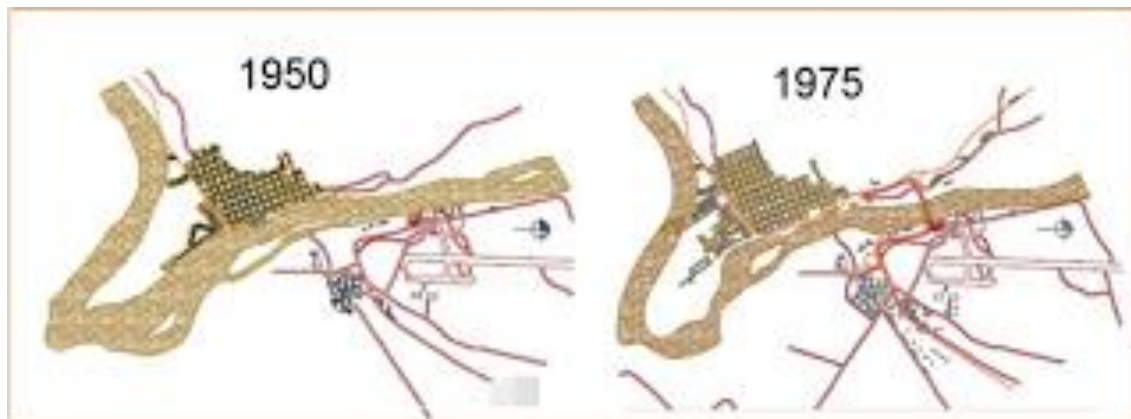


Imagen 44: Dinámica del meandro Conejo en La Dorada. Ladorada.gov.co

La imagen muestra los cambios dramáticos del meandro de la curva Conejo frente al barrio Bucamba, en La Dorada, circunstancia que llevó a considerar a principios del siglo XX el lugar, como “punto cero” de la navegación del río.

La navegación por el Magdalena es viable en naves de poco calado para contenedores: hoy cuando se estima factible garantizar 4,5 pies de profundidad en un canal navegable de medio centenar de metros en el tramo Puerto Berrío-La Dorada, se proyecta movilizar por lo menos 11 millones de toneladas por año a lo largo de todo el río, en los próximos años.

Las embarcaciones portacontenedores deberán contemplar, además de frecuentes meandros la velocidad del Magdalena con unos 3 nudos, lo que impone condiciones a sus esloras, radios de curvatura del canal navegable y velocidad de navegación efectiva de los convoyes remontando el río. Desde una perspectiva de transporte verde, además de recuperar la deforestada cuenca del Magdalena, no se deberá dragar el canal sin comprometer los humedales del gran río y establecer arreglos de remolcadores con planchones que se adapten a los meandros del río.

- **El Catatumbo.** Con 440 km. de largo es más importante para Venezuela que para Colombia. Nace en la Mesa de Ocaña y desemboca en el Golfo de Maracaibo.

- **El Atrato.** Cobra nombre en el proyectado Canal Interoceánico. Este río considerado como el más caudaloso del mundo en proporción a su cuenca y longitud, nace en el cerro Plateado y recorre 700 km. para morir en el Golfo de Urabá formando un delta de varias bocas.

- **El San Juan.** Nace en el cerro Caramanta, cruza una de las regiones más ricas en metales preciosos de América del Sur y una de las zonas más húmedas del mundo por la gran pluviosidad. Después de 380 km. en gran parte navegables lleva al Pacífico más de 1000 m³ de agua por segundo, con lo que se mantiene en el mayor caudal de toda la vertiente del Pacífico Sur Americano.

- **El Patía.** Nace en el Sotará cerca del Macizo Colombiano, corre inicialmente por un surco intercordillerano que tal vez fue un antiguo lago y después de recibir las aguas del Guáitara que corre en sentido opuesto por el mismo surco, rompe la cordillera para buscar salida al océano a través de una llanura selvática llena de esteros y rica en oro. De sus 400 km. buena parte son navegables.

- **El Mirá.** Nace el nudo ecuatoriano de Ibarra y sirve de límite internacional en un corto trayecto. Después de 300 km. este río sumamente navegable llega al Pacífico bañando una zona deshabitada pero de tierra fértiles.

- **El Orinoco.** Con un recorrido de 2900 km., de los cuales 1670 son navegables, nace en la Sierra Parima en los límites con el Brasil. Por su curso y su cuenca es el tercer río de Sur América que corre primero en dirección occidental hasta la frontera colombo-venezolana donde tuerce hacia el norte. En los 420 km. fronterizos recibe el Guaviare de 1350 km. y que debiera considerarse como la verdadera fuente del río por su caudal y longitud, el Vichada de 720 km., el Meta de 1060 km., también fronterizo y el Arauca de 1000 km. casi totalmente navegable como el Meta. De los raudos de Maipures en adelante el Orinoco es perfectamente navegable, se desenvuelve por una llanura de pradera, pasa por Angostura y entra en su zona de delta que es selvática y pantanosa, para desembocar en el Atlántico por un delta de numerosos brazos.

- **El río Amazonas.** Es el mayor del mundo con una longitud de 6275 km. que lo colocan en el segundo puesto después del Nilo, tiene un curso navegable de casi 5000 km. (que incluyen los 115,5 kilómetro del trapecio amazónico), que lo sitúan en el primer lugar de la tierra, sin contar los innumerables afluentes navegables por grandes vapores en mucha parte de su curso. Cuenta con más de 1100 tributarios como el Caquetá de 2200 km. en Colombia.

Después de Leticia el ancho medio es de 50 km. y su profundidad media de 50 metros. Debido a lo plano y bajo de las tierras que recorre el río se ensancha en medio de la llanura, formando islas, caños, esteros, a veces mares interiores en los que no se mira la otra orilla y llega a tener oleaje; es en ésta parte en donde el Amazonas recibe los mayores afluentes. A pesar de desembocar por dos enormes brazos en medio de los cuales está la isla de Marajó las aguas del río entran con tanta fuerza en el Atlántico que se siente su flujo 300 km. mar adentro.

17.7- MOHÁN: SIN BOGAS ¿PA' ONDE VA EL RÍO?



Imagen 45: Champanes, vapores y convoyes por el Magdalena, en Credencial, El Planeta y Cormagdalena.

Se ha desarrollado el 23 de septiembre en Honda, el III Foro público: ¿Para dónde va el río Magdalena?, evento preparado por el Foro Nacional Ambiental, el PDP-MC y Fescol, para tratar sobre los riesgos del proyecto de navegabilidad del río y las perspectivas de desarrollo en el Magdalena Centro, toda vez que el tramo Berrío-La Dorada será el principal nodo de transporte fluvial para la Región Andina, el que se accederá

por Gamarra y La Dorada en razón a que el Altiplano y el Norte del Valle son los centros de gravedad de generación de carga de ese habitado y mediterráneo territorio.

Para empezar, la hidrovía del Magdalena tiene una capacidad fluvial máxima de 500 millones de toneladas-año, y una demanda cercana a los 12 millones toneladas anuales para diferentes tipos de carga. Hoy, la navegación se da desde Barrancabermeja hasta la costa en una longitud de 630 Km, y más adelante entre Barranca y La Dorada cuando se acometa la adecuación del dinámico río, en el que se pretende establecer un canal navegable y estable de 42 m de ancho, aunque con riesgo de exceder las condiciones naturales del variable curso, consecuencia de soportar el diseño sólo en simulaciones sin llegar a los necesarios modelos.

Se contempla, además de dragados de mantenimiento en 900 km entre La Dorada y Barranquilla, estructuras de encauzamiento en 260 km desde Puerto Salgar hasta Barrancabermeja, para establecer ese canal navegable que tendría inicialmente de 4,5 pies de calado hasta puerto Berrio, y 6 de allí a Barranca. El problema a futuro, lo causaría el dragado adicional para dejar todo en 7 pies, a fin de facilitar el acceso de convoyes con 6 pies de calado hasta el puerto caldense: al extralimitar la capacidad del sistema biofísico, se desconectarían los ecosistemas con severo impacto ecológico y afectación grave para los pescadores.

Para la gestión integral de la gran cuenca Cauca-Magdalena, en razón a la complejidad de este biodiverso y pluricultural territorio que cubre el 23,6% del suelo continental de la patria, donde habita el 67,7% de los colombianos y se genera el 85 % del PIB nacional, urge una adecuación de los instrumentos de política pública acorde a los desafíos del cambio climático, si se quiere una gestión socioambiental que proteja ecosistemas y pescadores, o de lo contrario los desaciertos darían al traste con la anhelada navegación, al desconocer la naturaleza de un río enfermo y contaminado que descarga 172 millones de toneladas anuales de sedimentos, y no mitigar los eventos extremos esperados del calentamiento global, en este histórico y poblado escenario objeto de un proyecto excluyente y fragmentado, pensado para beneficiar únicamente carbón y petróleo.

Es que definitivamente, recuperar la navegación del Magdalena debería ser una tarea integral que contemple la reforestación de las cuencas tributarias que están en un 40% deforestadas, implementando una intervención para la hidrovía que no comprometa los humedales y ecosistemas del río, y una recuperación incluyente y compatible con los pescadores y ecosistemas del río. Y respecto a los convoyes, para una solución de transporte verde, en lugar de remolcar tres pares de barcazas con 7200 ton, se podría elevar la frecuencia y remolcar sólo dos de hasta 3,5 pies de calado llevando 5000 ton hasta Caracolí, adaptando los convoyes al río y no lo contrario al requerirse menores radios de curvatura en el canal navegable, lo que evitaría la desconexión del río con los ecosistemas de humedales y llanuras de inundación. Además, esto redundaría en economías de tiempo remontando el río.

Si la cuantiosa inversión se justifica en la implementación de un sistema intermodal de carga eficiente, deberían contemplarse trenes que lleguen a la hidrovía desde el Altiplano y el Norte del Valle; no obstante, si la carga del río alcanzó a 2 millones de toneladas al año en la década del 2000 donde 1,5 millones fueron hidrocarburos, y si en contenedores Bogotá sólo genera 6 millones de toneladas anuales, habrá que implementar la locomotora del carbón andino exportado al Pacífico, para hacer viable el transporte intermodal con los trenes pasando por la hidrovía, o de lo contrario la ventaja económica de la intermodalidad y la relación costo-beneficio del proyecto estarían comprometidos.

[Ref.: La Patria. Manizales, 2015-09-28]

17.8 DESDE LOS ANDES AL ORINOCO Y AL AMAZONAS



Imagen 46: Cuencas del Orinoco en es.wikipedia.org y del Amazonas en www.educ.ar

Mientras el 80 % de la producción agrícola de EE UU se transporta por el Mississippi, y en Europa de 26 mil kilómetros de rutas fluviales, el 38% son artificiales, la Orinoquia y la Amazonia pese a una red hídrica natural asociada a tan considerable región que comprende el 46,7 % de la superficie sudamericana, esperan ver consolidados dos proyectos vitales para su identidad y desarrollo, y para la integración de América del Sur: primero, la hidrovía Orinoco-Meta que parte del Delta de Amacuro sobre el Atlántico venezolano, pasa por Puerto Carreño y llega a Puerto López en el Meta, para buscar conexión por tierra con el Pacífico en Buenaventura; y segundo, la hidrovía del Amazonas que parte de Belem do Pará en el Atlántico brasilero y cierra en los Andes, alcanzando a Puerto Asís por el río Putumayo, u otras alternativas aguas arriba de Leticia, como Puerto Francisco de Orellana denominado El Coca (Ecuador) siguiendo el Amazonas – Napo, o Pucallpa (Perú) si se opta por el Amazonas – Ucayali.

Como ciudades del Orinoco, sobresalen Arauca y San Fernando de Apure. La primera con una población de 102 mil habitantes y la venezolana con 165 mil almas, tienen posibilidad de navegación confiable en embarcaciones de hasta 60 pasajeros, o 25 ton de carga equivalentes a un contenedor de 20 pies, integrándose así por el modo fluvial Venezuela y Colombia. Antes del boom petrolero tras el descubrimiento del pozo de Caño Limón, la población de Arauca llegaba a 14 mil habitantes.

Contrariamente, sobre la región central y occidental de la cuenca del Amazonas, en medio de la inmensa jungla los referentes urbanos que han brillado a lo largo de la corta historia de América, son Iquitos con 2 millones de habitantes y Manaus con 430 mil, ambos protagonistas de la Fiebre del Caucho (1880-1914), importante fenómeno histórico, económico y social del extenso territorio amazónico cuyas huellas se advierten, tanto en la arquitectura europeizada de los tesoros patrimoniales de Iquitos, como en las construcciones de Manaus, ciudad considerada a finales del siglo XX la “París de los trópicos” por sus lujosas e imponentes construcciones. Veamos estas hidrovías de importancia para Colombia, fundamentales para la conectividad interna de los 38 millones de habitantes propios, cuya concepción parte de los corredores bioceánicos del IIRSA (Brasilia 2000).

1- La Hidrovía Orinoco-Meta, con su conexión por tierra a la Región Andina, permitiría estructurar un corredor logístico, al integrar el Pacífico Colombiano con el Atlántico en el delta de Amacuro, mediante un eje de transporte combinado, fundamental para la dinámica integradora colombo-venezolana, extendiendo sus brazos al Arauca, Apure, Vichada, Portuguesa, Guaviare y Vaupés. En efecto, el modo fluvial se empalmaría, en primera instancia con la carretera que va por La Línea a Buenaventura de 830 km, y a futuro con un medio férreo de 950 km que reduce fletes hasta la tercera parte respecto al modo carretero, utilizando el tren para ascender al Altiplano (130 km), bajar a La Dorada, continuar al Km 41 mediante el Ferrocarril Cafetero y salir a Buenaventura.

2- Respecto a la Hidrovía Amazonas, complementada con su red hídrica navegable, incorpora a su cadena de valor los puertos brasileros de Manaus, Coari, Tefé e Iquitos en un trayecto de 1221 km, ofreciendo su mayor proyección por Ecuador al articular a Quito a una ruta comercial entre Manta en el Pacífico y Belem sobre el Atlántico, que se recorre en 15 a 20 días. Adicionalmente, la vasta hidrovía se bifurca por el poniente, en la desembocadura del Putumayo en San Antonio do Içá, donde las embarcaciones menores pueden acceder a Puerto Leguizamo y Puerto Asís en Colombia, y luego al remontar el Amazonas aguas arriba de Leticia hasta la desembocadura del río Napo, donde aparece Puerto Coca o Francisco de Orellana. Coca ubicado a 3440 km del Atlántico, es el punto de conexión de la hidrovía con la ruta que viene de Quito y Manta, y también paso obligado para llegar por el mismo río a Iquitos, localizado a mitad de distancia entre Leticia y la confluencia de los ríos Maraón y Ucayali, dos grandes cauces peruanos que dan origen al gran Amazonas cuyas aguas son navegables con embarcaciones de 15 pies de calado hasta Iquitos, y de 9 pies en toda su extensión.

[Ref.: La Patria. Manizales, 2015-07-6]

Lecturas complementarias

El territorio como sujeto en el contexto del Magdalena Centro.

El concepto de territorio y su aplicación al Magdalena Centro, fruto la experiencia vivida en diferentes escenarios de Caldas donde se están dando proceso para la solución de los conflictos socioambientales más relevantes: Marmato, Chinchiná, La Dorada, y tres importantes cuencas, entre ellas la del río Guarinó y Charca de Guarinocito, gracias a las enseñanzas aportadas por sus comunidades de base y actores estratégicos comprometidos con el Plan de Acción Inmediata PAI, entre ellos el PDPMC, para transformar las acciones emprendidas durante tres años, en hechos de Paz y de esperanza.

Ver en: <http://bdigital.unal.edu.co/5705/1/gonzaloduqueescobar.20123.pdf>

Arocafé: consideraciones técnico-económicas.

Esta obra que ayer se proyectó sobre enormes terraplenes que incorporaban la incertidumbre propia de cualquier obra subterránea, ahora se ha proyectado sobre un viaducto de concreto y con una pista 8 mts más baja que modifica su dirección, para reducir sustancialmente la magnitud de los llenos e incertidumbre natural del proyecto, pero a un costo superior. Ver en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/42598/1/gonzaloduqueescobar.201440.pdf>

Una salida al mar para el occidente colombiano.

El occidente colombiano, región que moviliza el 40% de la carga de Colombia, debe resolver la salida al Caribe por Urabá y no por Cartagena. Se propone, además de la navegación por el Magdalena entre Honda - La Dorada y el Caribe, conectar en Urabá la Autopista del Café con la Troncal del Caribe y avanzar con el Tren de Occidente al mismo

lugar. Para sacar y entrar las mercancías de la Región Andina hacia y desde el Caribe, ambos medios resultan más económicos que el modo carretero, ya que los fletes por agua resultarían 6 veces más económicos y los ferroviarios 3 a 4 veces.

Ver en: <http://bdigital.unal.edu.co/1690/1/gonzaloduqueescobar.200910.pdf>

El Ferrocarril Cafetero para la competitividad de Colombia.

El gran impacto del Ferrocarril Cafetero para Colombia, parte de articular el Sistema Férreo Central con el Tren de Occidente en el Km 41 y con la hidro vía del Magdalena en La Dorada, para facilitar la multimodalidad y el transporte de carga a menor costo entre Región Andina y los mares de Colombia, detonando de paso dos plataformas logísticas: una entre La Dorada y Honda, y otra entre La Felisa y La Virginia. Este tren andino de 150 km y el Túnel Cumanday doble de unos 17 km, con la Transversal Cafetera incluida, costarían cerca de \$7 billones. No obstante, si se desea, puede omitirse la carretera y en lugar de doble túnel, se puede hacer uno solo para el tren, más largo y de menor pendiente para hacerlo más eficiente. Mientras lo túneles viales deben ser dobles y más cortos, los ferroviarios pueden ser sencillos y tres veces más largos.

Ver en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/45950/13/gonzaloduqueescobar.201451.pdf>

Anotaciones a las vías de Caldas.

Vías estratégicas para mejorar las condiciones de accesibilidad y conectividad de las subregiones de Caldas, identificadas por diferentes actores sociales del departamento, donde además del escarpado relieve y singular distribución demográfica, la principal barrera orográfica del territorio es la cordillera central, y en menor grado el río Cauca y los principales afluentes del Magdalena. Este ejercicio, parte del presupuesto de que el transporte rural, cumple una misión fundamental al facilitar la conectividad y la movilidad como catalizadores de la reducción de la pobreza.

Ver en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/51487/1/anotacionesalaviasdecaldas.pdf>

ENLACES PARA EL MAGDALENA CENTRO

MAGDALENA CENTRO COMO NODO ANDINO INTERMODAL

<http://www.bdigital.unal.edu.co/54142/7/magdalencentrocomonodoandinointermodal.pdf>

UN TREN ANDINO PARA LA HIDROVÍA DEL MAGDALENA

<http://www.bdigital.unal.edu.co/48024/1/untrenandinoparalahidroviadelmagdalena.pdf>

IMPACTO POR LA MULTIMODAL EN EL MAGDALENA CENTRO

<http://www.bdigital.unal.edu.co/42001/1/gonzaloduqueescobar.201439.pdf>

FERROCARRILES E HIDROVÍA, CLAVES PARA LA MULTIMODALIDAD

<http://www.bdigital.unal.edu.co/47753/1/Ferrocarrileshidroviaclavesparamultimodalidad.pdf>

FERROCARRIL VERDE E HIDROVÍA DEL ATRATO

<https://godues.wordpress.com/2015/03/28/ferrocarril-verde-e-hidrovia-del-atrato/>

IDEAS SUMARIAS SOBRE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA

<https://godues.wordpress.com/2015/04/03/ideas-sumarias-sobre-proyectos-de-infraestructura/>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
(1867-2017)



MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS

Gonzalo Duque-Escobar

MANIZALES, 2016

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>

[Presentación](#)

[Contenido](#)

[Cap01](#) Ciclo geológico

[Cap02](#) Materia y Energía

[Cap03](#) El sistema Solar

[Cap04](#) La Tierra sólida y fluida

[Cap05](#) Los minerales

[Cap06](#) Vulcanismo

[Cap07](#) Rocas ígneas

[Cap08](#) Intemperismo ó meteorización

[Cap09](#) Rocas sedimentarias

[Cap10](#) Tiempo geológico

[Cap11](#) Geología estructural

[Cap12](#) Macizo rocoso

[Cap13](#) Rocas Metamórficas

[Cap14](#) Montañas y teorías orogénicas

[Cap15](#) Sismos

[Cap16](#) Movimientos masales

[Cap17](#) Aguas superficiales

[Cap18](#) Aguas subterráneas

[Cap19](#) Glaciares y desiertos

[Cap20](#) Geomorfología

[Lecturas complementarias](#)

[Bibliografía](#)

Anexo 1: Agua y Clima

<http://www.bdigital.unal.edu.co/54046/>

Anexo 2: Calentamiento global en Colombia

<http://www.bdigital.unal.edu.co/3673/>

Anexo 3: Desafíos del Complejo Volcánico Ruiz – Tolima

<http://www.bdigital.unal.edu.co/9484/>

Anexo 4: Economía para el constructor

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1698/>

Anexo 5: Gestión del riesgo

<http://www.bdigital.unal.edu.co/47341/>

Anexo 6: Geotecnia para el trópico andino

<http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/>

Anexo 7: La Luna

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1663/>

Anexo 8: ¿Para dónde va el Magdalena?

<http://www.bdigital.unal.edu.co/51046/>

Anexo 9: Túnel Manizales

<http://www.bdigital.unal.edu.co/2046/>

Anexo 10: UMBRA: La Ecorregión Cafetera en los mundos de Samoga

<http://www.bdigital.unal.edu.co/50853/>

Anexo 11: Mecánica de los suelos

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1864/>

.
[El Autor:](#) Gonzalo Duque-Escobar

HOME:

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>